

nota sobre los cementos puzolano-metalúrgicos fouilloux (*)

Desde el 20 de septiembre de 1951, la Société des Matériaux de Construction de la Loïsne, fabrica, bajo licencia de la patente francesa n.º 1.035.771 "Nouveaux Ciments" (Nuevos Cementos), de la que es titular M. Fouilloux, actualmente Presidente-Director general de la Sociedad, los cementos puzolano-metalúrgicos C. P.-M. F. n.º 1-160/300 y C. P.-M. F. n.º 2-210/375; las ventas no han cesado de progresar y excedían de los 2×10^6 t en 1.º de enero de 1965 (ver figura). Representan actualmente algo más del 45 % de las ventas totales de la Sociedad.

Estos cementos están esencialmente constituidos por una mezcla de clinker portland, escoria granulada de horno alto y puzolana; en la práctica se utiliza como puzolana, la ceniza volante puzolánica procedente del despolvo electrostático de las centrales térmicas alimentadas con carbón pulverizado.

No ha sido posible la utilización de las cenizas volantes puzolánicas para la fabricación de cementos que, sin recurrir al empleo de aceleradores de fraguado o de endurecimiento, proporcionen una progresión de resistencia en el tiempo que sea comparable en las primeras edades, y ulteriormente, superior a la de los cementos portland y que posean muy altas cualidades de indescomposibilidad frente a los agentes agresivos, sino apoyándose sobre un hecho que, si bien la experiencia demuestra, es, *a priori*, bastante paradójico: en las mezclas ternarias portland-escoria-puzolana, la acción puzolánica aparece más rápidamente y con mayor intensidad que cuando la puzolana se halla solamente en presencia del clinker de portland.

De esta comprobación ha nacido la patente francesa Fouilloux n.º 1.035.771, de 5 de abril de 1951.

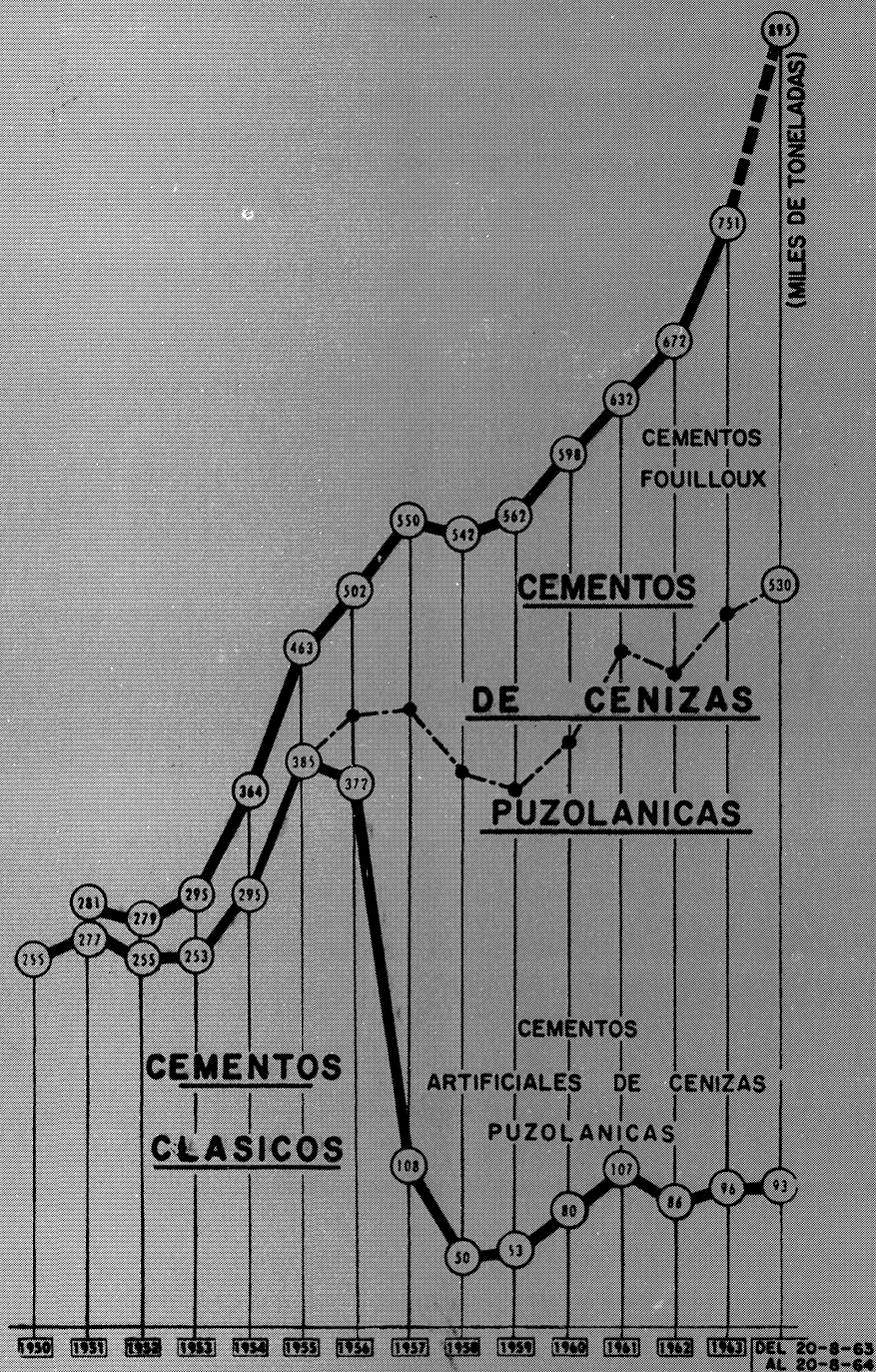
Las cenizas utilizadas deben poseer propiedades puzolánicas bien definidas; es necesario, para ello, buscar cenizas volantes de hulla con un contenido en cal pequeño ($\text{CaO} < 4\%$); débil proporción de carbono sin quemar (6 % como máximo), y que contengan por lo menos 85 % de la suma $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Se puede apreciar rápidamente la calidad puzolánica de las cenizas determinando su residuo insoluble en ácido clorhídrico, de donde se deduce el total de los elementos ácidos, y luego, el mismo residuo insoluble después de una cocción durante 1 hora a 1.000°C de las cenizas adicionadas con clinker; se debe encontrar, entonces, un residuo insoluble reducido a un tercio del de la ceniza bruta.

(*) Datos facilitados por el señor L. Guillaume, Director Técnico de la Sociedad de Materiales de Construcción de LA LOISNE, a quienes agradecemos la posibilidad de publicación en esta Revista.

Industrialmente, los 3 constituyentes, con una pequeña adición de yeso, se muelen simultáneamente, lo que asegura, además de una mezcla muy homogénea, la molturación de las cenizas; esta molienda al desnudar la parte interior, más activa, de los granos de ceniza, facilitará y acelerará la aparición de la actividad puzolánica.

Estos cementos se venden actualmente en las dos clases siguientes, con resistencias a compresión de 7 y 28 días, medidas sobre mortero normal francés (mortero RILEM) conforme a la norma P. 15 403: C. P-M. F. n.º 1 ... 160-300 y C. P-M. F. n.º 2 ... 210-375.



Evolución de la fabricación de cementos desde 1951 a 1964.

Estas resistencias deben compararse con las normalizadas en Francia para los cementos:

160-250 y 210-325.

La ficha de características físicas y mecánicas de estos cementos es la siguiente:

		C. P.-M. F. n.º 1	C. P.-M. F. n.º 2
Superficie específica Blaine cm ² /g		3.720	3.800
Peso específico, g/cm ³		2,86	2,82
Principio del fraguado		5 horas	3,30 horas
Fin del fraguado		de 9 a 15 horas	9 horas
Tiempo de fisuración en anillo a 20° C y 50 % de humedad relativa		38 horas	22 horas

		P.-M. F. n.º 1		P.-M. F. n.º 2	
		R	G	R	G
Retracción (R) y Crecimiento (G) sobre mortero RILEM, en micras por metro.	2 días	195	0	94	31
	7 días	313	63	281	63
	14 días	594	94	531	94
	21 días	656	94	594	94
	28 días	750	125	625	94
Resistencia (R) a la compresión sobre mortero RILEM, en kg/cm ² .		R		R	
	2 días	107		140	
	7 días	232		276	
	28 días	414		452	
	90 días	567		605	

En cuanto se refiere a su composición química, nos limitaremos a señalar que su contenido en cal total es de 41/42 % para el C. P.-M. F. n.º 1 y de 44/45 % para el C. P.-M. F. número 2.

La puesta en obra de estos cementos es la misma que la de los cementos clásicos; la ceniza volante puzolánica no exige, contrariamente a otras puzolanas, un exceso de agua en el momento de la mezcla; produce hormigones grasos fáciles de poner en obra y de compactar, que envuelven perfectamente las armaduras; para los trabajos debajo del agua evita el deslavado de los hormigones frescos y facilita el trabajo de los buzos o de los hombres-rana, los cuales pueden trabajar sin verse envueltos en una capa lechosa que reduce la visibilidad considerablemente.

Es también la ceniza volante la que procura, al desencofrar, los paramentos lisos y las aristas vivas tan apreciadas en todas las obras y, en particular, para la prefabricación.

Para las obras de gran masa —presas de pantano, diques en el mar—, el reducido calor de hidratación de los cementos puzolano-metalúrgicos limita la elevación de temperatura de los hormigones.

Por término medio, el calor de hidratación total de estos cementos es inferior en un 20 a un 30 % del de los portland; como se libera menos de prisa que en los portland, las elevaciones de temperatura en las primeras edades son muy escasas, lo que trae consigo una notable reducción en la retracción térmica.

Una vez endurecidos, los cementos puzolano-metalúrgicos dan hormigones compactos, y prácticamente impermeables si la dosis de cemento es suficiente. Esta impermeabilidad mejora con el tiempo y se hace casi absoluta con la marcha de la hidratación del cemento, la cual va acompañada de la formación de geles sílico-alumínicos que se oponen a la penetración del agua en el seno del hormigón. La acción puzolánica se activa con el calor húmedo; en consecuencia, los hormigones de cemento puzolano-metalúrgico van bien para la prefabricación pesada o ligera, con tratamiento a la estufa o a la autoclave.

De interés para los constructores, la ceniza volante tiene por efecto reducir notablemente la retracción hidráulica de los hormigones; si se compara la retracción de un C.P.A. y de un C.P.A. C., se nota para este último una reducción de más del 20 % en relación con el C.P.A. Los valores para los C. P-M. F. núms. 1 y 2, mencionados anteriormente, responden ampliamente a los diferentes Pliegos de Condiciones de las administraciones francesas para las obras de hormigón armado o de hormigón pretensado.

Mejor aún que los cementos puzolánicos, los cementos puzolano-metalúrgicos dan hormigones químicamente muy resistentes; poseen, como cualidades importantes, su impermeabilidad, su débil contenido en cal total y, por último, la fijación por la puzolana, bajo forma de silicato monocálcico insoluble en agua y estable, de la cal liberada por la hidratación del clínker.

Los hormigones de cemento puzolano-metalúrgico resisten particularmente bien a las aguas agresivas naturales, sulfatadas o puras, a las aguas residuales y al agua de mar.

La resistencia química de estos “nuevos cementos” ha sido comprobada por numerosos ensayos en diferentes laboratorios y por su comportamiento en diversas obras.

El Laboratorio Central de “Ponts et Chaussées” —Caminos, Canales y Puertos— ha confeccionado cubos de mortero normal conforme a la antigua norma francesa P 15 301: 12 cubos de 5 cm para cada edad (7, 28 y 90 días); de ellos 6 amasados con agua de mar artificial y 6 con agua dulce. La composición del agua de mar artificial donde se conservaron todos los cubos era la siguiente:

1.000	g de agua destilada;
30	g de cloruro sódico;
6	g de cloruro magnésico cristalizado;
5	g de sulfato magnésico;
1,5	g de sulfato cálcico hidratado;
0,2	g de carbonato potásico.

Se trataba, pues, de un agua particularmente agresiva, ya que su contenido en sulfatos es muy superior al de un agua selenitosa saturada.

Las resistencias a la compresión (kg/cm²) han sido las siguientes (promedio de los 12 cubos rotos en cada fecha):

	7 días	28 días	90 días
P.-M. F. n.º 1	294	466	522
P.-M. F. n.º 2	310	477	553

El considerable aumento de la resistencia a la compresión entre el 7.º y el 90.º día demuestra el perfecto comportamiento de ambos cementos en presencia del agua agresiva.

El laboratorio de ensayo de materiales de la Villa de París ha conservado cubos de mortero normal y cubos de pasta pura que estaban parcialmente sumergidos en una solución saturada de sulfato de calcio; esta inmersión parcial favorece, por capilaridad y evaporación, la migración de sales agresivas.

Los resultados a la compresión han sido los siguientes (promedio de 6 cubos para las 4 primeras edades y de 3 cubos para la última):

	2 días	7 días	28 días	90 días	3 años
kg/cm²	111	195	355	505	625

Ensayos análogos efectuados con cubos de mortero normal de C. P.-M. F. n.º 2 han dado, después de 6 años y medio, una resistencia a la compresión de 741 kg/cm².

En nuestros laboratorios se ha procedido a realizar ensayos análogos en cuanto a la conservación, pero sobre barras prismáticas de $4 \times 4 \times 16$ hechas con mortero RILEM, obteniéndose las resistencias a la compresión siguientes:

	2 días	7 días	28 días	90 días	6 meses	1 año
P.-M. F. n.º 2	129	269	488	662	756	785

Estas resistencias deben compararse con los valores medios de compresión sobre cubos de mortero normal conforme a la antigua norma P 15 301, conservados en agua potable, obtenidas por el laboratorio de la Villa de París sobre las muestras de cemento tomadas en nuestra fábrica en el curso del año 1961:

	2 días	7 días	28 días	90 días
P.-M. F. n.º 2	135	269	451	645

Otros ensayos han sido realizados según el método del Centro de Estudios Científicos y Técnicos de Grenoble, preconizado por el Profesor Berthier: se confeccionan pastillas de mortero normal 1/3 amasado con una relación a/c de 0,60 (es decir, un mortero bastante poroso) que tengan 4 mm de espesor y 40 mm de diámetro. Estas pastillas se conservan durante 40 horas en ambiente húmedo a saturación, y más tarde se sumergen en agua potable o en agua saturada de yeso con adición de 10 g de sal marina por litro. Las muestras se someten a una prueba de tracción por hendidura a las 48 horas, 7 días y 28 días.

Todos los ensayos efectuados sobre 6 probetas en cada edad han mostrado que las resistencias a la tracción sobre las diferentes muestras eran idénticas en las diferentes edades, cualquiera que fuese el agua en que hubieran sido conservadas. Se trata de pruebas rápidas; pero, teniendo en cuenta la porosidad del mortero y las pequeñas dimensiones de las pastillas, el más mínimo ataque químico llevaría consigo un descenso brusco y notable

de la resistencia a la tracción, que sería tanto más marcado cuanto mayor fuese la expansión, la cual llegaría a descomponer la pastilla.

Los cementos puzolano-metalúrgicos han sido ampliamente utilizados en terrenos seletivos. Citaremos, en particular, los cimientos del viaducto de Boudry, cantón de Neuchâtel (Suiza), a propósito del cual M. Jeanneret ha escrito en el *Journal de la Construction de la Suisse Romande (Diario de la Construcción de la Suiza Romana)*, n.º 2, del 30 de enero de 1960, págs. 86-87: "En ese terreno inestable, los constructores han descubierto filones de yeso; éste ataca el hormigón hecho con cemento ordinario. Es por lo que ha sido necesario buscar un cemento especial. Se ha escogido el cemento francés Fouilloux, que ha dado plena satisfacción y ha sido de una puesta en obra mucho más fácil".

Han sido empleados para la construcción de porciones importantes en los desagües N.-E. y Saint Denis-Achères, utilizados para el saneamiento de la región parisina. La mayoría de estas obras han sido ejecutadas en terrenos bañados por las aguas de una capa fuertemente cargada de sulfato de calcio. Todas estas obras se comportan perfectamente. Debemos mencionar, de modo especial, el sifón de la Frette, obra circular de 3,85 m de diámetro exterior, de hormigón pretensado, que permite el paso debajo del Sena de la rama de Achères del desagüe general de las aguas de alcantarillado de París.

Esta obra, terminada desde hace varios años y que no ha sido puesta aún en servicio, es de una estanquidad absoluta a pesar de la fuerte presión de agua que soporta.

De 1953 a 1954 han sido utilizadas 5.200 t de C. P.-M. F. n.º 2 por la Société Sondages, Injections et Forages por cuenta de la Empresa Fougerolles, de acuerdo con la Energía Eléctrica de Marruecos, para los trabajos de inyección de la galería de traída de aguas de Aït-Ouarda a Afourer (Marruecos), que atraviesa terrenos yesosos.

Bajo la supervisión de la Dirección General de los Servicios Técnicos de la Villa de París, y por la Société des Grands Travaux de Marseille y la Empresa Campenon-Bernard, ha sido casi enteramente construido en C. P.-M. F. n.º 2 (11.900 t) el mayor depósito de agua del mundo, de hormigón pretensado, del servicio de aguas de París, cuya construcción se termina en las Puertas de las Lilas. Para proteger este depósito se le ha rodeado con un muro, *en contacto con margas supra-yesosas*, de 16 m de alto, con una longitud total de 580 m, de hormigón armado, montado en encofrados deslizantes a la velocidad media de 3,50 a 4 m diarios, enteramente con cemento Fouilloux n.º 2.

Électricité de France construyó en la nueva central Arrighi, en Vitry-sur-Seine, con cemento P.-M. F. n.º 2, una chimenea de 160 m de altura que es el récord de Europa en su género.

La Société des Grands Travaux de Marseille ha construido el primer gran parque de estacionamiento de automóviles subterráneo de París debajo de la Explanada de los Inválidos, en 8 meses, con 3.200 t de C. P.-M. F. n.º 2, en hormigón tradicional y en hormigón pretensado tratado en estufa.

La Société des Entreprises Boussiron ha utilizado 12.500 t de C. P.-M. F. n.º 2 para la construcción del puente de carretera y ferrocarril de Abidjan, de hormigón pretensado, de 550 m de longitud total, con vigas tubulares prefabricadas de 46,50 m de longitud total, 9,20 m de ancho y 5,80 m de altura con un peso total de 800 t cada una.

Los cementos puzolano-metalúrgicos se comportan asimismo bien en las obras marítimas.

Hemos tenido recientemente ocasión de examinar una muestra de hormigón tomado sobre un bloque de 7 años de edad. A continuación figura la dosificación del hormigón, por metro cúbico:

Cemento P-M. F. n.º 2	313	kg.
Grava 40/70	1.250	kg.
Arena de dunas	385	kg.
Arena caliza	375	kg.
Agua	145	l.
Plastocrete	1,5	kg.

La dosificación es notable por la discontinuidad de los áridos y, para una obra marítima, por la dosificación reducida del cemento.

La muestra procedía de un bloque de 50 t (colocado con una vibración muy enérgica), confeccionado en mayo de 1955 y sumergido durante el verano de 1955. La cota de donde fue tomada la muestra (+ 5,00) permite afirmar que el bloque permaneció cubierto por el agua del mar durante más de la mitad de su existencia; y por formar parte de la escollera de un dique ha estado particularmente expuesto al choque de las olas.

El examen de secciones pulidas y de secciones delgadas, tanto a la luz normal como a la luz polarizada, ha mostrado en su parte superficial, sobre 3 ó 4 mm, una carbonatación descubierta con un indicador de pH (fenolftaleína); la masa del hormigón subyacente indica una cristalización fina y regular con algunos elementos no-hidratados; pero en esta parte no se ha comprobado fisura alguna, ni observado cal libre o formaciones sulfatadas.

Numerosas obras marítimas han sido ejecutadas desde hace 10 años con el C. P-M. F. n.º 2 en los puertos franceses del Canal de la Mancha, del Atlántico y del Mediterráneo, en Africa del Norte (Argel, Bône, Dakar), en Madagascar y recientemente en Karachi (Pakistán) para la refección de la toma de agua en el mar de una central térmica.

Desde su aparición en el mercado, pronto hará 15 años, el consumo de estos cementos puzolano-metalúrgicos ha ido regularmente en aumento (ver figura).

Los usuarios fueron en un principio seducidos por la untuosidad de los hormigones producidos y la facilidad con que se compactaban. Han apreciado también su rendimiento mecánico comparable, en sus primeras épocas, al del portland; pero superior, a los 3 meses y al año. Por último han reconocido sus cualidades de durabilidad, las cuales hacen que estos cementos sean los elegidos para todas las obras en terrenos agresivos y, principalmente, para terrenos yesosos.